



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

**“Estudio experimental del fenómeno erosión-corrosión en aceros
empleados para ductos”**

PRESENTAN:

César Sedano de la Rosa

(Alumno del Doctorado en Ingeniería Mecánica, Posgrado SEPI – ESIME - ZAC - IPN).

E – Mail cesar_sedano@prodigy.net.mx

Manuel Vite Torres

(Investigador del Posgrado en Ingeniería Mecánica del SEPI – ESIME - ZAC - IPN).

E – Mail drmanuelvite9@hotmail.com

Juan R. Laguna Camacho

(Investigador de la Universidad Veracruzana, Fac. de Ing. Mecánica-eléctrica, Campus Poza Rica, Ver.)

E – Mail juanrlaguna@hotmail.com

Ezequiel A. Gallardo Hernández



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

(Investigador del Posgrado en Ingeniería Mecánica del SEPI – ESIME - ZAC - IPN).

Edgar Ernesto Vera Cárdenas

(Investigador de la Universidad Politécnica de Pachuca, Zempoala Hgo., México).

E – Mail evera@upp.edu.mx

Noviembre de 2013.

“Estudio experimental del fenómeno erosión-corrosión en aceros empleados para ductos”

RESUMEN

En el presente proyecto se evaluará el comportamiento de desgaste en aceros empleados para el transporte de fluidos en la industria mexicana sometidos a condiciones de erosión y corrosión, con el objetivo de establecer los mecanismos de desgaste del material provocado por la sinergia de estos dos fenómenos desde el punto de vista mecánico-tribológico, impulsado por el grupo de Tribología de la SEPI-ESIME-ZAC. La morfología de las superficies se evaluará por medio de microscopía óptica, electrónica y de fuerza atómica, se realizarán ensayos de desgaste de erosión sólida con partículas abrasivas y ensayos de corrosión potencioestática, para obtener las propiedades tribológicas, tales como volumen perdido, tasa de erosión y velocidad de corrosión, finalmente con los resultados de los ensayos mecánicos y electroquímicos se



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

representará el proceso de remoción de material debido a los fenómenos complementarios de erosión-corrosión por medio de un trazado de mapas de desgaste.

PALABRAS CLAVE

Erosión, corrosión, aceros para ductos, tribología, potencioestado.

ABSTRACT

In this project the wear behavior of steels used in fluids transport on Mexican industry under conditions of erosion and corrosion will be evaluated in order to establish the wear mechanisms of the material caused by the synergy of these two phenomena from a mechanical-tribological standpoint, driven by the group of Tribology SEPI - ESIME - ZAC. The surface morphology will be evaluated by optical, electronic and atomic force microscopy, solid erosion wear tests with abrasive particles and potentiostatic corrosion tests will be performed to obtain tribological properties, such as volume loss, erosion rate and corrosion speed, finally with mechanical and electrochemical lab results shall be drawn the material removal process due to additional erosion-corrosion phenomena by means of wear mapping.

KEYWORDS

Erosion, corrosion, pipeline steels, tribology, potentiostatic.

I. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de erosión-corrosión es un proceso de desgaste que envuelve la interacción entre varios parámetros simultáneamente como lo son mecánicos, electroquímicos y metalúrgicos. Este fenómeno es multidisciplinario, el cual demanda conocimientos de física, química, metalurgia, tribología e ingeniería. Es interesante que las palabras erosión y corrosión provienen del mismo verbo en latín “*rodere*”, el cual



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

significa roer. Sin embargo, desde un punto de vista filosófico, la erosión envuelve un desgaste mecánico mientras la corrosión es un proceso de desgaste electroquímico. La severidad del desgaste en los materiales se agrava por la interacción de estos dos procesos. Los cuales son algunas veces sinérgicos o antagónicos [1].

Madsen en 1988, realizó un estudio mediante un ensayo de desgaste por compuestos acuosos desarrollado por la Oficina de Minas del Departamento del Interior de Estados Unidos de América, con el fin de establecer relaciones entre la erosión y la corrosión de las muestras de metal. Se realizaron tres tipos de pruebas para determinar la tasa de desgaste debido sólo a la erosión, la tasa de corrosión electroquímica y la tasa total de desgaste erosivo-corrosivo. Los resultados de la prueba mostraron que los efectos combinados de la erosión y la corrosión resultaron en tasas globales de desgaste que eran mucho mayores que los efectos de cada proceso por separado, mostrando así un fuerte efecto sinérgico resultante entre la erosión y la corrosión [2].

Durante el proceso de transporte de hidrocarburos, la superficie metálica de la tubería está expuesta a un flujo corrosivo el cual provoca erosión-corrosión, en donde el proceso mecánico de remoción de metal debido a la erosión y el proceso electroquímico de corrosión son acoplados. La pérdida de masa resultante es más elevada que la suma de pérdida de masa debida a la erosión pura y corrosión pura, la interacción entre estos dos procesos ha sido descrita por diferentes investigadores como un efecto sinérgico. Como el petróleo y el gas emergen de una formación geológica siempre vienen acompañados por ciertas cantidades de agua y gases ácidos, como el dióxido de carbono (CO_2). La corrosión del acero al carbón en ambiente de CO_2 continúa siendo un problema constante en la industria del petróleo y gas, el problema causado por la interacción de la erosión y la corrosión es severo y el mecanismo de sinergia no está completamente entendido debido a su complejidad [3].

Stack en 2012, realizó un estudio sobre el desempeño de la erosión-corrosión aplicado a muestras de acero al carbón en soluciones de agua-petróleo crudo, presentando como resultado un mapeo del mecanismo erosión-corrosión, estos mapas muestran el régimen de transición entre la erosión y la corrosión. También presenta mapas de desgaste para



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

demostrar las diferencias entre niveles de desgaste en función de la velocidad y potencial electroquímico. Finalmente exhibe mapas de erosión-corrosión aditiva-sinergia, estos mapas muestran la transición en la degradación del material con el cambio de la velocidad de impacto y potencial aplicado, haciendo manifiesto el comportamiento sinérgico y antagonista como característica del proceso de erosión-corrosión [4].

En general este proyecto de tema de tesis doctoral es pertinente y su estudio busca contribuir en sentar las bases para el desarrollo e investigación del fenómeno de erosión-corrosión ya que representa todo un laboratorio completo para corroborar los resultados de dicho estudio, desde el punto de vista mecánico-tribológico impulsado por el grupo de Tribología de la SEPI-ESIME-ZAC.

a. HIPÓTESIS

La evaluación pertinente del comportamiento de desgaste debida al fenómeno de erosión-corrosión en aceros empleados para ductos, utilizados en la industria mexicana para el transporte de fluidos, estudiados bajo condiciones controladas a fin de determinar las posibles causas-efectos del fenómeno de erosión-corrosión, así como la caracterización del desgaste del material y la interacción sinérgica de la erosión-corrosión.

b. JUSTIFICACIÓN

En la industria petrolera, la transportación de hidrocarburos ocupa un lugar muy importante, siendo la transportación por ductos la forma más segura de realizarlo desde los centros de producción y procesamiento a los centros de consumo, contribuyendo a incrementar la seguridad, mejorando la competitividad y protegiendo el medio ambiente. Cerca de la mitad de los ductos que se encuentran instalados en el territorio nacional a cargo de PEMEX, tienen más de 30 años en operación y a pesar del constante mantenimiento ocurren problemas provocados por la corrosión y fallas del material, debido a esto, es necesario no solo para esta empresa nacional, si no para todas aquellas dedicadas a la transportación de algún tipo de fluido, realizar estudios de corrosión a los



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

materiales de dichos ductos, para disminuir este tipo de problemas. De acuerdo con el Departamento del Transporte de Estados Unidos (DOT), la segunda causa común de las fallas en tuberías que transportan hidrocarburos es la corrosión, que incluye la corrosión interna y externa [5].

La acción conjunta de desgaste y corrosión en ambientes acuosos salinos es conocida como la causa de falla prematura de componentes en ingeniería. La combinación de líquidos agresivos y la presencia de altas cantidades de partículas sólidas en los sistemas de bombeo, asociado con la industria del petróleo y gas son representantes de algunas de las más severas condiciones de operación enfrentadas por materiales actuales. Altos costos directos e indirectos son típicamente asociados con la falla de componentes tales como impulsores de bombas, ejes, carcazas y tuberías [6].

En la actualidad Pemex cuenta con una gran infraestructura de ductos marinos y terrestres. En los próximos años, como consecuencia del desarrollo de nuevos proyectos de transporte de hidrocarburos, se tiene previsto el diseño y construcción de nuevos ductos. Por lo anterior, se debe contar con una normatividad actualizada acorde con las exigencias de los trabajos a desarrollar y que cumpla con los requerimientos necesarios para tener instalaciones seguras. Parte de este proceso consiste en la selección de los materiales y fabricación de las conexiones y accesorios de acuerdo al tipo de servicio. Debido a lo anterior se consideran los resultados de proyectos de investigación plasmados en estándares internacionales por estar a la vanguardia y contener los últimos avances tecnológicos en el transporte de hidrocarburos muy corrosivos. Asimismo, los fabricantes se han adaptado a los cambios e incluyen una diversidad de materiales de acuerdo a las necesidades de la industria petrolera, utilizando aquellos con la más alta resistencia para los diferentes servicios [7].

Un elevado desgaste y consumo excesivo de materiales de mantenimiento, así como bajos niveles de seguridad en el manejo de hidrocarburos, son aspectos de capital importancia que deben ser considerados para justificar el llevar a cabo una investigación de carácter mecánico-tribológico en el grupo de Tribología de la SEPI-ESIME-ZAC-IPN.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Lo anterior representado mediante un modelo de estudio valioso para el desarrollo y mejora de tecnología en sistemas de transporte de fluidos a nivel nacional e internacional.

c. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La transportación de hidrocarburos a través de ductos es una parte primordial en la infraestructura de la industria petrolera a nivel mundial. Los ductos transportan de manera segura, materia prima para refinerías, así como los productos obtenidos de esas a los mercados de consumo incluyendo pequeños consumidores y la industria. Los ductos históricamente han sido los medios más seguros para el transporte de gas natural y de líquidos peligrosos. Sin embargo, las fallas ocurridas han propiciado el aumento del conocimiento en estos sistemas, en particular, donde las ciudades han crecido se encuentran localizadas sobre los ductos. La principal falla en ductos mexicanos para el transporte de crudo, gas natural, gasolina y condensados, es la corrosión. Los accidentes reportados en Estados Unidos de Norte América debido a fallas en ductos de transmisión y recolección de gas natural y líquidos peligrosos, según la DOT (Department of Transportation) y la OPS (Office of Pipeline Safety), muestran que más del 30% de estas fallas se atribuyen a daños mecánicos por terceros (abolladuras) y el 30% a corrosión interna y externa. En los 10 últimos años el Grupo de Análisis de Integridad de Ductos ha trabajado en los análisis de integridad probabilísticos, dando un paso adelante con respecto a los análisis de integridad determinísticos, en los que trabajan con defectos como corrosión donde los estados límite ya se han identificado. Los modos de falla para un ducto dependen sobre todo del estado mecánico que guarda el ducto con defectos y su parte operacional así como, de métodos de protección empleados y estrategias de mantenimiento e inspección implementadas. Para ductos de acero, una de las formas dominantes de deterioro es la corrosión. Este es un problema potencial y se agrava aún más en ductos cuya vida de servicio es prolongada. El mayor defecto de la corrosión es la pérdida de espesor del ducto, esto resulta en una baja capacidad para el transporte del fluido debido a que se reduce la seguridad del ducto y por tanto se debe reducir la presión de operación del mismo. La corrosión en ductos por su ubicación puede ser interna o externa, la corrosión interna puede ser causada por los mismos componentes del fluido



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

como agua, dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y también puede ser promovida por actividad microbiológica. La corrosión externa puede ser causada por condiciones en el suelo debido a altos o bajos potenciales de hidrógeno (pH), actividad microbiológica, concentración de humedad, sales, corrientes parásitas y otras más [8].

d. OBJETIVOS

i. OBJETIVO GENERAL

Evaluar de manera pertinente el comportamiento del fenómeno de erosión-corrosión en aceros utilizados en ductos de recolección y transmisión de fluidos procesados, para determinar los daños superficiales por los fenómenos erosión-corrosión, así como la caracterización del desgaste de los aceros utilizados.

ii. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar por medio de microscopía óptica, electrónica y de fuerza atómica el daño superficial por el fenómeno de erosión-corrosión en aceros empleados en ductos.
- Evaluar las propiedades mecánicas de los aceros para ductos
- Realizar ensayos de erosión sólida con partículas abrasivas
- Realizar ensayos de corrosión potencioestática.
- Obtener las propiedades tribológicas (corrosión-erosión), tales como: Volumen perdido, tasa de erosión y velocidad de corrosión.

II. METODOLOGÍA



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

a. Para el trabajo de doctorado se propone presentar una investigación tribológica de los fenómenos de erosión-corrosión.

i. Marco Teórico.

- Corrosión potencioestática
- Erosión de partícula sólida
- Desgaste erosivo-corrosivo
- Investigación en artículos científicos, tesis, etc.
- Tipos de equipos y normas internacionales para estudio de erosión-corrosión.

ii. Experimentación

- Ensayos de erosión sólida con partículas abrasivas
 - Ensayos de corrosión potencioestática
 - Caracterización por medio de microscopía óptica, electrónica y de fuerza atómica el daño superficial por el fenómeno de erosión-corrosión en aceros empleados en ductos
 - Obtención de tasas de desgaste, volumen perdido y velocidad de corrosión.
- b. Con la finalidad de investigar el fenómeno erosión-corrosión, existen equipos ampliamente aceptados para este propósito en condiciones cercanas a la realidad de operación, para realizar los ensayos erosivos y corrosivos de acuerdo a las normas ASTM G5-94(1999) Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, así como la norma ASTM G76 - 07 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, respectivamente.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635



Fig. 1 Potenciostato marca E&G.



Fig. 2 Tribómetro erosionador construido por el grupo de tribología de la SEPI-ESIME-ZAC-IPN.

III. RESULTADOS

Finalmente con los resultados de los ensayos mecánicos y electroquímicos que se obtengan se representará el proceso de remoción de material debido a los fenómenos complementarios de erosión-corrosión por medio de un trazado de mapas de desgaste. Como parte fundamental de esta propuesta de investigación se desarrollarán de 2 a 3 papers en revistas especializadas e indizadas en JCR, así como la participación en eventos nacionales e internacionales.

IV. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rajahram S., Harvey T., Wood R., “Full factorial investigation on the erosion-corrosion resistance of UNS S31603”, *Tribology International*, Vol. 43, 2010, pp 2072-2083.
- [2] Madsen B., “Measurement of erosion-corrosion synergism with a slurry wear test apparatus”, *Wear*, Volume 123, Issue 2, 1988, pp 127-142.
- [3] Aminul M., et al., “Erosion enhanced corrosion and corrosion enhanced erosion of API X-70 pipeline steel”, *Wear* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.041>.
- [4] Stack M., Abdulrahman G., “Mapping erosion-corrosion of carbon steel in oil-water solutions: Effects of velocity and applied potential”, *Wear*, 274-275, 2012, pp 401-413.
- [5] De la Cruz, J., Tesis, “Propuesta de inspección a ductos que transportan hidrocarburos con equipo instrumentado, mediante técnicas de ultrasonido y fuga de flujo magnético”, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2011.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

- [6] Neville A., Hodgkiess T., Dallas J., “A study of the erosion-corrosion behavior of engineering steels for marine pumping applications”, *Wear*, 186-187, 1995, pp 497-507.
- [7] Norma NRF-096-PEMEX-2010, “Conexiones y accesorios para ductos de recolección y transporte de hidrocarburos”, Comité de normalización de Petróleos Mexicanos y organismos subsidiarios, Subcomité técnico de normalización de PEMEX-exploración y producción, 2010.
- [8] Mortera I., Tesis, “Análisis probabilístico de integridad mecánica de ductos que transportan hidrocarburos”, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, 2004.
- [9] Norma NRF-001-PEMEX-2013, “Tubería de acero para recolección, transporte y distribución de hidrocarburos”, Comité de normalización de Petróleos Mexicanos y organismos subsidiarios, Subcomité técnico de normalización de Petróleos Mexicanos, 2013.
- [10] ASTM G5-94(1999) Standard Reference Test Method for Making
Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- [11] ASTM G76 - 07 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid
Particle Impingement Using Gas Jets.